

Publisher:

Professor Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. Wolfgang Beitz  
Technical University of Berlin

Professor Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote  
Otto-von-Guericke - University of Magdeburg  
California State University, Long Beach, USA

ISBN 3-540-67777-1, 20<sup>th</sup> edition, Springer Publishing  
House Berlin Heidelberg New York  
ISBN 3-540-62467-8, 19<sup>th</sup> edition, Springer Publishing  
House Berlin Heidelberg New York

CIP - Cataloguing in publication of *Deutsche Bibliothek*.

*Taschenbuch für Maschinenbau* (Engineering Handbook) /  
Dübbel, published by W. Beitz and K.-H. Grote - 20<sup>th</sup>  
revised and extended edition - Berlin; Heidelberg; New  
York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris;  
Singapore; Tokyo: Springer, 2001  
ISBN 3-540-67777-1

This work is protected by copyright. The rights thereby  
created are thus reserved, in particular those of  
translation, reprinting, presentation, removal of images  
and tables, radio transmission, microfilming, or  
reproduction in other ways and storage in data processing  
systems, even in case of use of only extracts.  
Reproduction of this work of parts of this work is  
admissible also in individual cases only within the  
boundaries of the legal provisions of the Copyright Act  
of the Federal Republic of Germany of 9 September 1965 in  
the valid version. It is in principle subject to a fee.  
Infringements are subject to the criminal provisions of  
the Copyright Act.

© Spring Publishing House Berlin Heidelberg 1929, 1935,  
1940, 1941, 1943, 1953, 1961, 1970, 1974, 1981, 1983,  
1986, 1987, 1990, 1995, 1997 and 2001.  
Printed in Germany

The reproduction of trade marks, trade names, goods  
descriptions etc. in this work does not entitle the  
reader to assume, without special designation, that such  
names are regarded as without restriction in the sense of  
legislation covering goods descriptions and trade mark  
protection and can thus be used by anybody.

Should reference be made in this work directly or  
indirectly to laws, regulations or guidelines (e.g. DIN,

VDI, VDE) or citations be made therefrom, the publishing house cannot assume any liability for these items being accurate, complete or up-to-date. It is recommended that you should consult the complete regulations or guidelines in the valid version for your own works.

Cover design: Friedhelm Steinen-Broo, Estudio Calamar, Pau/Spanien

Produced by: Birgit Münch, Berlin

Typesetting: Stürtz AG Würzburg

Announcements: Edda Lückermann, Renate Birkenstock, Springer Publishing House, Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Tel: 030 8 27 87 732, Fax: 030 8 27 87 300, email: [r.birkenstock@springer.de](mailto:r.birkenstock@springer.de)

Printed on acid-free paper. SPIN 10733029. 60/3020mh -  
5 4 3 2 1 0.

### Metallic coatings

These are achieved galvanically, through hot dip coatings, metal spraying, plating or through diffusion as well as through vapour deposition.

### Galvanic coatings

They are produced through electrolysis in appropriate baths (acids or aqueous solutions) of the relevant metal salts. The thickness of the coating thereby depends upon the current density and the exposure time (coating thickness usually up to 10  $\mu\text{m}$ ). Due to the varying current density on edges and indentations the coating thickness is not entirely uniform. A precondition for good adhesion of the coating is a grease-free and oxide-free surface (degreasing, pickling) and a precondition for effective protection of the base metal is a sealed, pore-free coating. Parts are galvanically plated with tin, copper, zinc, cadmium, nickel or chromium. In addition to the pure metals, alloys (e.g. brass) are also deposited. Nickel-plating without current is carried out to an increasing extent today. An important factor for corrosion protection is the position of the base and coating material in the so-called galvanic series, which orders the metals according to their dissolution potential, measured against hydrogen. Electro-negative metals are regarded as non-noble, electro-positive as noble. In the presence of an electrolyte the less noble of the two metals is always affected unless the original potential is changed through surface passivation (in case of Al e.g. on the nobler side). The following galvanic series (in V) applies to potentials of the most important metals against hydrogen:

Mg -2.40	Cr - 0.51	Ni -0.25		Cu +0.35
Al -1.69	Fe -0.44	Sn -0.16	H = +/- 0	Ag +0.81
Zn -0.76	Cd -0.40	Pb -0.13		Au +1.38

In case of decorative chromium plating, firstly copper plating, then nickel plating and in a coating thickness of less than 1  $\mu\text{m}$  chromium plating generally take place. Hard chromium layers (in baths with a greater current density and higher temperature) result, in case of Vickers hardness values of 800 to 1000 HV, in a very high wear resistance. In thicker hard chromium coatings residual tensile stresses form which can lead in case of

formation of cracks to an impairment in the mechanical properties, in particular the dynamic strength.

### **Hot dip coatings**

Through dipping in liquid molten metal (hot dip tin plating, hot dip zinc plating, hot dip lead plating, hot dip aluminium plating), corresponding alloy layers are formed (with the exception of lead plating) as a result of diffusion processes between the metal atoms of the liquid coating metal and the atoms of the base metal. When the parts are removed from the bath there is a layer of pure coating metal.

In comparison with galvanic coatings, in case of hot dip coatings the coating thickness and hence the corrosion protection duration is greater (coating thickness for hot dip zinc plating 25 to 100  $\mu\text{m}$ , for hot dip aluminium plating 25 to 50  $\mu\text{m}$ ). An advantage of the hot dip coatings is that the molten metal also reaches hollow spaces and hard-to-reach locations.

The workpieces must never contain completely closed hollow spaces (explosion risk).

On wide band sheet metal, Zn and Al coatings are applied in continuously working processes (Sendzimir process). Al coatings provide the sheet metal with good heat and scale resistance with improved mechanical properties in relation to pure Al. Both Zn and Al layers can be conveyed through diffusion annealing into Fe-Zn and Fe-Al alloy layers (galvanealing process; calorisation).

### **Metal spray coatings**

They are used with particularly large workpieces or those which are only to be treated locally. The metal in wire or powder form is thereby melted through a combustible gas mixture or arc and is centrifuged in the form of fine droplets through compressed air onto the workpiece to be treated. The adhesion on the upper surface is purely mechanical, which is why the surface should be roughened through sandblasting to a medium roughness. The process is suitable for metals with a point of fusion up to 1600°C. In order to compensate for the porosity of the spray coatings they are saturated with solutions of epoxy resins or compacted through rolling or pressing. Main fields of application: corrosion protection and repair of parts subject to wear.

Low Pressure Plasma Spraying (LPSS) is used in the

application of protective layers against hot gas corrosion on industry and aero turbine blades of the type MCrAlY, typical layer thicknesses up to max 300  $\mu\text{m}$ .

#### **Plating:**

It is carried out today mostly according to the method of roll weld plating. Either base or plating material is thereby enclosed in thin head plates, heated, rolled and the head plates are removed through pickling, or the plate is wrapped with the plating material, heated and rolled under a high rolling pressure. The plating of Al alloys with pure aluminium or of steel with rust-resistant steel, copper, nickel, monel metal or aluminium are usual.

Containers in the chemical industry are from time to time coated by weld plating.

#### **Diffusion coatings**

They are produced through annealing of the workpieces in metal powder of the coating metal (e.g. Zn, Cr, Al, W, Mn, Mo, Si) in an oxygen-free atmosphere, possibly with the addition of chlorides at temperatures below the point of fusion (400°C for zinc coatings with "sherardisation", 1000°C for aluminium with alitisation, 1200°C for chromium with chromising).

#### **Vapour deposition of thin layers** (CVD/PVD layers)

In order to improve the wear and / or corrosion protection of workpieces and components, it is possible for metals, carbides, nitrides, borides and oxides from the gaseous phase to be deposited on tool or component surfaces through CVD (chemical vapour deposition) or PVD (physical vapour deposition).

The CVD method is based upon solid material deposition through chemical gas phase reactions in the temperature range between 800 and 1100°C [2]. The deposition of TiC and TiN layers as wear protection layers is of particular technical significance. On account of the high deposition temperatures in CVD processes hard metals are preferably coated in case of cutting materials, and predominantly ledeburitic chromium steels (e.g. X210CrW12) in case of cold work steels.

In contrast, in case of plasma-supported vacuum coating technologies of the PVD processes deposition temperatures below 300°C can be maintained, so that for example high

speed steels or heat-treatable steels can be used as substrate materials [2].

As a replacement for the hard chromium layers deposited with electrolytes which are associated with environmental problems, PVD technology allows Cr, CrN and Cr<sub>2</sub>N layers to be deposited with good properties (corrosion and wear), which are starting to be used in metal working technology and in automotive and mechanical engineering.

PtAl layers are used as protection against hot gas corrosion for industry and aero gas turbine blades; typical layer thicknesses up to 70  $\mu\text{m}$ .

DUBBEL  
TASCHEN  
FÜR DEN  
MASCHIN  
20. AUFLA



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Beitz  
Technische Universität Berlin  
Professor Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
California State University, Long Beach, USA

ISBN 3-540-67777-1 20. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ISBN 3-540-62467-8 19. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek:

Taschenbuch für den Maschinenbau / Doppel. Hrg. von W. Beitz  
und K. H. Grote. – 20., neubearbeitete und  
erweiterte Aufl. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ;  
Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ;  
Singapur ; Tokio : Springer, 2001  
ISBN 3-540-67777-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1929, 1935, 1940, 1941, 1943, 1953, 1961, 1970, 1974, 1981, 1983, 1986, 1987, 1990, 1993, 1997 and 2001  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: Friedhelm Steinen-Broo, Estudio Calamar, Pau/Spain  
Herstellung: Birgit Münch, Berlin  
Satz: Süriz AG, Würzburg

Anzeigen: Edda Lückermunn, Renate Birkenstock, Springer-Verlag, Heidelberger Platz 3,  
14197 Berlin, Tel. 030/82787-732, Fax: 030/82787-300, e-mail: [r.birkenstock@springer.de](mailto:r.birkenstock@springer.de)  
Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN 10733029 60/3020mh - 5 4 3 2 1 0



**Galvanische Überzüge.** Sie werden durch Elektrolyse in geeigneten Bädern (Säuren oder wässrigen Lösungen) der betreffenden Metallsalze erzeugt. Die Dicke des Überzugs hängt dabei von der Stromdichte und der Expositionszeit ab (Überzugsdicke üblicherweise bis zu 10 µm). Wegen der unterschiedlichen Stromdichte an Kanten und Einbuchtungen fällt die Überzugsdicke meist ganz gleichmäßig aus. Voraussetzung für gutes Halten des Überzugs ist eine feine und oxydierbare Oberfläche (Entfetten, Beizen). Im wässrigen Schutz des Grundmetalls von dicker, poröser Überzug. Auf galvanischen Wege werden Teile verzinkt, verkupfert, verzinnt, verchromt, vernickelt oder verchromt. Außer den reinen Metallen werden auch Legierungen (z.B. Messing) abgeschieden. Heute wird auch in großem Umfang elektrolytisch verchromt. Wichtig für den Korrosionsschutz ist die Stellung von Grund- und Überzugsmaterial in der sog. Potentialspannungsreihe, die die Metalle nach ihrem Lösungspotential, gemessen gegen Wasserstoff, ordnet. Elektropositivere Metalle gehen als anodisch verkorrosivierendes an. In Anwesenheit eines Elektrolyten wird immer das unedlere der beiden Metalle angegriffen, wenn nicht durch Oberflächenpassivierung das ursprüngliche Potential verändert wird (bei Al z.B. zur edleren Seite). Für die Potentialreihe der wichtigsten Metalle gegen Wasserstoff gilt folgende Spannungsreihe (in V):

Mg -2,40	Cu -0,31	Ni -0,23	Cu +0,34
Al -1,69	Fe -0,44	Sn -0,16	H = 0
Zn -0,76	Cd -0,40	Pb -0,13	Au +1,38

Beim alkalischen Verzinken wird in der Regel erst verchromt, dann vernickelt und in einer Überzugsdicke von weniger als 1 µm verchromt. Hartchromschichten (im Badern mit größerer Stromdichte und höherer Temperatur) ergeben bei Vickers-Härten von 800 bis 1.000 HV einen sehr hohen Verschleißwiderstand. In dickeren Hartchromüberzügen bilden sich Zugspannungen aus, die bei Ritzbildung zu einer Bruchkrümmung des mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Schwingfestigkeit, führen können.

**Schmelztauchüberzüge.** Durch Tauchen in flüssige Metallschmelzen (Feuerverzinzen, Feuervernikeln, Feuerverchromen) werden (mit Ausnahme des Verbletens) infolge von Diffusionsvorgängen zwischen den Metallatomen des flüssigen Überzugsmetalls und des Atoms des Grundmetalls entsprechende Legierungsschichten gebildet. Beim Herausziehen des Teile aus dem Bad befindet sich darüber eine Schicht aus reinem Überzugsmetall.

Im Vergleich zu galvanischen Überzügen ist bei Schmelztauchüberzügen die Überzugsdicke und damit die Korrosionsschichtdünner größer (Überzugsdicke beim Feuerverzinzen 25 bis 100 µm, beim Feuerverchromen 25 bis 50 µm). Ein Vorteil des Schmelztauchüberzuges liegt darin, daß die Schmelze auch in Hohlräume und an schwer zugängliche Stellen gelangt.

Die Werkstücke dürfen nie vollständig geschlossene Hohlräume enthalten (Explosionsgefahr).

Auf Brandtauchverfahren werden heute Zn- und Al-Überzüge in kommerziell anwendbaren Verfahren (Sendzimir-Verfahren) aufgebracht. Al-Überzüge verbleten den Stahlblech gute Härte- und Zugschweißfestigkeit bei im Vergleich zu reinem Al besseren mechanischen Eigenschaften. Sinteral-Zn- als auch Al-Schichten lassen sich durch Diffusionsglätten in Fe-Zn- bzw. Fe-Al-Legierungsschichten überführen (Kulturieren-Verfahren, Kulturieren).

Bringungsgemisch oder durch Leimlötlagen erschmolzen und Form leiner Tropfen durch Druckluft auf das zu beschichtende Werkstück geschleudert. Die Haftung auf der Oberfläche ist rein mechanisch, weshalb diese durch Sandstrahlen in mehreren Richtungen aufgeraut sein soll. Das Verfahren eignet sich für Metalle mit einem Schmelzpunkt bis zu 1.000 °C. Zum Ausgleich der Porosität der Spritzüberzüge werden diese mit Lösungen von korrosionsverhindernden durch Walzen oder Pressen verdichtet. Hauptanwendungsbereich: Korrosionsschutz und Reparatur von Verschleißteilen.

Das Niederdruckspritzverfahren (Low Pressure Plasma Spraying, LPPS) wird beim Aufbringen von Schutzschichten gegen Hochdruckkorrosion auf Industrie- und Flugtriebwerkschichten vom Typ MCRA eingesetzt. typische Schichtdicken bis zu 300 µm.

**Plattieren.** Es erfolgt heute meistens nach der Methode des Walzschweißplattierens. Dabei werden aus der Grund- und Plattenmaterial in dünne Kapseln eingetaucht, erwärmt, ausgewalzt und die Kapseln durch Belen entfernt, oder die Platte wird mit dem Plattierungsmittel umwickelt, erwärmt und in einem Walzdruck ausgewalzt. Üblich bei der Plattierung von Al-Legierungen mit Bismutaluminium oder von Stahl mit nichtrostendem Stahl, Kupfer, Nickel, Manganmetall oder Aluminium.

Bestand der chemischen Industrie werden mittlerweile durch Schweißplattierung ausgetauscht.

**Diffusionsüberzüge.** Sie entstehen durch Glühen der Werkstücke in Metallpulver des Überzugsmetall (z.B. Zn, Cr, Al, W, Mo, Ni, Si) in sauerstoffreicher Atmosphäre, evtl. unter Zugabe von Chloriden bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts (1.000 °C für Zinküberzüge beim „Sherardisieren“, 1.000 °C für Aluminium beim „Aluieren“, 1.200 °C für Chrom beim „Chromieren“).

#### Gasphasensecheidung dünner Schichten (CVD-/PVD-Schichten)

Zur Verbesserung des Verschleiß- und/oder korrosionsbestandes von Werkzeugen und Bauteilen können durch CVD- (chemical vapor deposition) oder PVD-Verfahren (physical vapor deposition) Metalle, Keramiken, Nitride sowie Oxide aus der Gasphase auf Werkzeug- oder Bauteiloberflächen abgeschieden werden.

Das CVD-Verfahren beruht auf der Feststoffabscheidung durch chemische Gasphasenreaktionen im Temperaturbereich zwischen 800 und 1.000 °C [2]. Von technischer Bedeutung ist vor allem die Abscheidung von TiC- und TiN-Schichten als Verschleißschutzschichten. Wegen der hohen Abscheidungstemperaturen beim CVD-Verfahren werden bei den Schmelzschichten vorzugsweise Hartmetalle, bei den Kaltmetallüberzügen überwiegend federharte Chromstähle (z.B. X210CrW12) beschichtet.

Im Unterschied hierzu können bei plasmaunterstützter Vakuumabscheidungs- und/oder PVD-Verfahren Abscheidungs-temperaturen unter 300 °C eingehalten werden, so daß beispielsweise Schmelzbleistahl oder Vergütungsstähle, als Substratwerkstoffe eingesetzt werden können [2].

Als Ersatz für die mit unumgänglichem Elektrolyten abgeschiedenen Hartchromschichten lassen sich mit der PVD-Technik Cr-, CrN- und CrN-Schichten mit guten Eigenschaften (Korrosion und Verschleiß) abscheiden, die Eingang in die Anwendung in der Umformtechnik, und im Fahrzeug- und Maschinenbau finden.

Für Industrie- und Flugtriebwerksbauteile werden PVD-Schichten als Schutz gegen Hochdruckkorrosion eingesetzt, typische Schichtdicken bis 70 µm.